



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2. 1 Pengertian Transformator

Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika.

Dalam bidang elektronika, transformator digunakan antara lain untuk :

1. Gandengan impedansi antara sumber dan beban.
2. Untuk menghambat arus searah sambil tetap melakukan arus bolak balik antara rangkaian.
3. Menaikkan atau menurunkan tegangan AC

Dalam bidang tenaga listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi :

1. Transformator daya
2. Transformator distribusi
3. Transformator pengukuran: yang terdiri dari transformator arus dan transformator tegangan⁵.

Berdasarkan frekuensi kerja, transformator dapat dikelompokkan menjadi :

1. Trafo frekuensi daya (50 – 60) Hz
2. Trafo frekuensi pendengaran (20 Hz – 20 KHz)
3. Trafo Middle Frekuensi (455 KHz)
4. Trafo Radio Frekuensi (>455 KHz)

⁵RIJONO, Yon, *Dasar Teknik Tenaga Listrik* (Edisi Revisi), Yogyakarta, Andi, 2002 Hal 1-4



2.2 Prinsip Kerja Transformator

Transformator terdiri atas dua buah kumparan (primer dan sekunder) yang bersifat induktif. Kedua kumparan ini terpisah secara elektris namun berhubungan secara magnetis melalui jalur yang memiliki reluktansi (reluctance) rendah. apabila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik maka fluks bolak-balik akan muncul di dalam inti yang dilaminasi, karena kumparan tersebut membentuk jaringan tertutup maka mengalirlah arus primer. Akibat adanya fluks di kumparan primer maka di kumparan primer terjadi induksi (self- induction) dan terjadi pula induksi di kumparan sekunder karena pengaruh induksi dari kumparan primer atau disebut sebagai induksi bersama (mutualinduction) yang menyebabkan timbulnya fluks magnet di kumparan sekunder, maka mengalirlah arus sekunder jika rangkaian sekunder di bebani, sehingga energi listrik dapat ditransfer keseluruhan (secara magnetisasi)

$$e = (-)N \frac{d\phi}{dt} \text{ (volt) } \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana : e = gaya gerak listrik (Volt)

N = jumlah lilitan

$\frac{d\phi}{dt}$ = perubahan fluks magnet (weber/ sec)

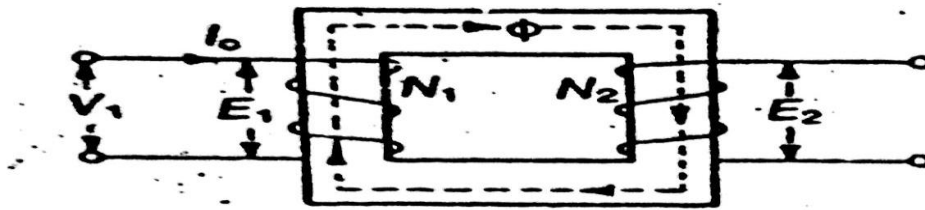
Perlu diingat bahwa hanya tegangan listrik arus bolak-balik yang dapat ditransformasikan oleh transformator, sedangkan dalam bidang elektronika, transformator digunakan sebagai gandengan impedansi antara sumber dan beban untuk menghambat arus searah sambil tetap melakukan arus bolak-balik antara rangkaian. Tujuan utama menggunakan inti pada transformator adalah untuk mengurangi reluktansi (tahanan magnetis) dari rangkaian magnetis (common magnetic circuit¹).

¹<http://industrielektrik.blogspot.co.id/2012/05/transformator.html>(diakses pada hari minggu , tanggal 21 mei 2017. Pukul 23.20 WIB)

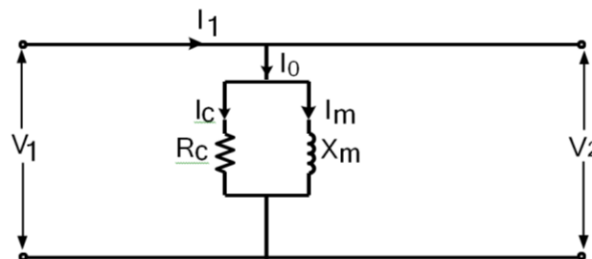


2.3. Keadaan Transformator Tanpa Beban

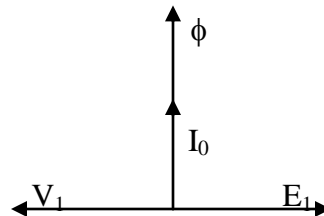
Bila kumparan primer suatu transformator dihubungkan dengan sumber tegangan V_1 yang sinusoidal, akan mengalirkan arus primer I_0 yang juga sinusoidal dan dengan menganggap belitan N_1 reaktif murni. I_0 akan tertinggal 90° dari V_1 . Arus primer I_0 menimbulkan fluks (Φ) yang sefasa dan juga berbentuk sinusoidal.



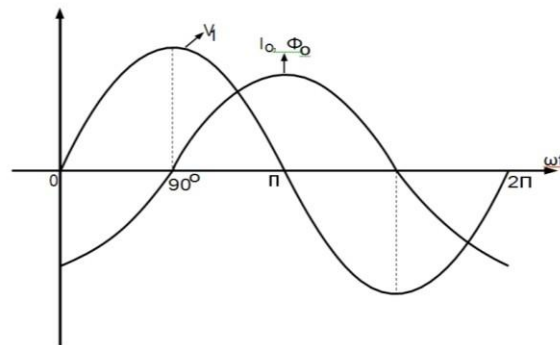
Gambar 2.1 Transformator dalam keadaan tanpa beban



Gambar 2.2 Rangkaian ekivalen transformator dalam keadaan tanpa beban



Gambar 2.3 Vektor transformator dalam keadaan tanpa beban

Gambar 2.4 Gelombang I_0 tertinggal 90° dari V_1

$$\phi = \phi_{max} \sin \omega t \text{ (weber) } \dots\dots\dots (2.2)$$

Fluks yang sinusoidal ini akan menghasilkan tegangan induksi e_1 (Hukum Faraday)

$$e_1 = - N_1 \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots (2.3)$$

$$e_1 = - N_1 = \frac{d(\phi_{max} \sin \omega t)}{dt} \dots\dots\dots (2.4)$$

$$e_1 = - N_1 \omega \phi_{max} \cos \omega t \text{ (Volt) } \dots\dots\dots (2.5)$$

$$e_1 = N_1 \omega \phi_{max} \sin (\omega t - 90) \text{ (tertinggal } 90^\circ \text{ dari } \phi) \dots\dots\dots (2.6)$$

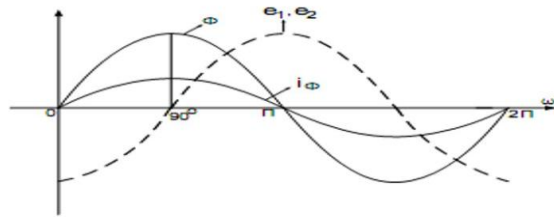
Dimana :

e_1 = Gaya gerak listrik (Volt)

N_1 = Jumlah belitan di sisi primer

ω = Kecepatan sudut putar (rad/sec)

ϕ = Fluks magnet (weber)

Gambar 2.5 Gambar gelombang e_1 tertinggal 90° dari ϕ

Harga efektif :

$$e_1 = \frac{N_2 \pi f \phi_{max}}{\sqrt{2}} \dots\dots\dots (2.7)$$

$$e_1 = \frac{N_1 2 \times 3,14 f \phi_{max}}{\sqrt{2}} \dots\dots\dots (2.8)$$

$$e_1 = \frac{N_1 6,28 f \phi_{max}}{\sqrt{2}} \dots\dots\dots (2.9)$$

$$e_1 = 4,44 N_1 f \phi_{max} \text{ (Volt)} \dots\dots\dots (2.10)$$

Pada rangkaian sekunder, fluks (ϕ) bersama tadi juga menimbulkan :

$$e_2 = - N_2 \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots (2.11)$$

Harga efektifnya :

$$e_2 = 4,44 N_2 f \phi_{max} \text{ (Volt)} \dots\dots\dots (2.12)$$

Sehingga perbandingan antara rangkaian primer dan sekunder adalah :

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = \alpha \dots\dots\dots (2.13)$$

Dimana :

e_1 = ggl induksi disisi primer (Volt)

e_2 = ggl induksi disisi sekunder (Volt)

N_1 = jumlah belitan disisi primer

N_2 = jumlah belitan disisi sekunder

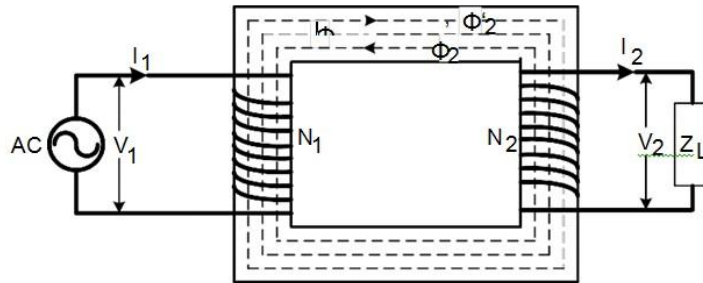
α = faktor transformasi⁷

⁷Zuhal, *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*, Jakarta, Gramedia Pustaka Utama, 1988,

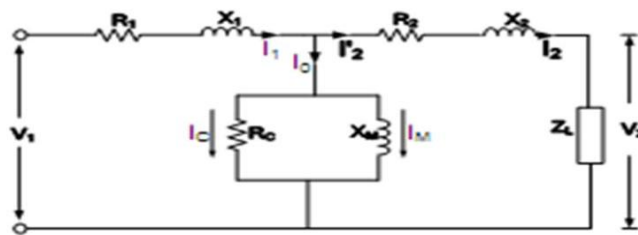


2.4. Keadaan Transformator Berbeban

Apabila kumparan sekunder dihubungkan dengan beban Z_L , I_2 mengalir pada kumparan sekunder, dimana $I_2 = \frac{V_2}{Z_L}$ dengan $\phi_2 =$ faktor kerja beban.



Gambar 2.6 Transformator dalam keadaan berbeban



Gambar 2.7 Rangkaian ekivalen transformator dalam keadaan berbeban

Arus beban I_2 ini akan menimbulkan gaya gerak magnet (ggm) $N_2 I_2$ yang cenderung menentang fluks (Φ) bersama yang telah ada akibat arus pemagnetan. Agar fluks bersama itu tidak berubah nilainya, pada kumparan primer harus mengalir arus I_2' , yang menentang fluks yang dibangkitkan oleh arus beban I_2 , hingga keseluruhan arus yang mengalir pada kumparan primer menjadi:

$$I_1 = I_0 + I_2' \text{ (Ampere) } \dots\dots\dots(2.14)$$



Bila komponen arus rugi inti (I_c) diabaikan, maka $I_0 = I_m$, sehingga :

$$I_1 = I_m + I_2' \text{ (Ampere) } \dots\dots\dots(2.15)$$

Dimana:

$$I_2 = \text{Arus pada sisi primer (Ampere)}$$

$$I_2' = \text{Arus yg menghasilkan } \Phi_2' \text{ (Ampere)}$$

$$I_0 = \text{Arus penguat (Ampere)}$$

$$I_m = \text{Arus pemagnetan (Ampere)}$$

$$I_c = \text{Arus rugi-rugi inti (Ampere)}$$

Untuk menjaga agar fluks tetap tidak berubah sebesar ggm yang dihasilkan oleh arus pemagnetan I_m , maka berlaku hubungan :

$$N_1 I_m = N_1 I_1 - N_2 I_2 \dots\dots\dots(2.16)$$

$$N_1 I_m = N_1 (I_m + I_2') - N_2 I_2 \dots\dots\dots(2.17)$$

$$N_1 I_2' = N_2 I_2 \dots\dots\dots(2.18)$$

Karena I_m dianggap kecil, maka $I_2' = I_1$, Sehingga :

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \dots\dots\dots(2.19)$$

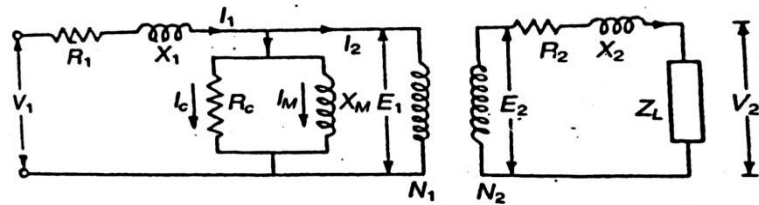
$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2} \dots\dots\dots(2.20)^7$$

⁷ Zuhail, *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*, Jakarta, Gramedia Pustaka Utama, 1988, Hal 46 - 47



2.5. Rangkaian Ekuivalen Transformator

Tidak seluruh fluks (ϕ) yang dihasilkan oleh arus pemagnetan I_M merupakan fluks bersama (ϕ_M), sebagian darinya hanya mencakup kemampuan primer (ϕ_1) atau kumparan sekunder saja (ϕ_2). Dalam model rangkaian (rangkaian ekuivalen) yang dipakai untuk menganalisis suatu kerja transformator, adanya fluks bocor ϕ_1 dan ϕ_2 ditunjukkan sebagai reaktansi X_1 dan X_2 . Sedangkan rugi tahanan ditunjukkan dengan R_1 dan R_2 . Dengan demikian ‘model’ rangkaian dapat dituliskan seperti gambar 2.8.



Gambar 2.8 Rangkaian Ekuivalen

Dari model rangkaian diatas dapat pula diketahui hubungan penjumlahan vektor :

$$V_1 = E_1 + I_1 R_1 + I_1 X_1 \dots\dots\dots (2.21)$$

$$E_2 = V_2 + I_2 R_2 + I_2 X_2 \dots\dots\dots (2.22)$$

$$E_1/E_2 = N_1/N_2 = \alpha \text{ atau } E_1 = \alpha E_2 \dots\dots\dots (2.23)$$

Hingga

$$E_1 = \alpha (I_2 Z_L + I_2 R_2 + I_2 X_2) \dots\dots\dots (2.24)$$

Karena

$$I_1/I_2 = N_2/N_1 = 1/\alpha \text{ atau } I_1 = \alpha I_2 \dots\dots\dots (2.25)$$

Maka

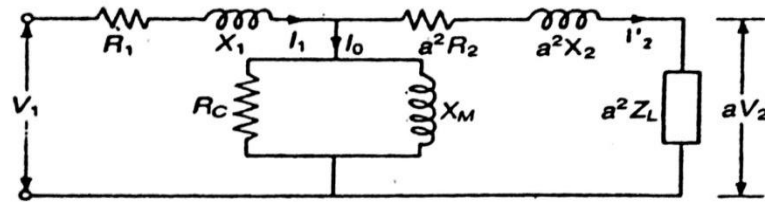
$$E_1 = \alpha^2 I_2 Z_L + \alpha^2 I_2 R_2 + \alpha^2 I_2 X_2 \dots\dots\dots (2.26)$$

Dan

$$V_1 = \alpha^2 I_2 Z_L + \alpha^2 I_2 R_2 + \alpha^2 I_2 X_2 + I_1 R_1 + I_1 X_1 \dots\dots\dots (2.27)$$

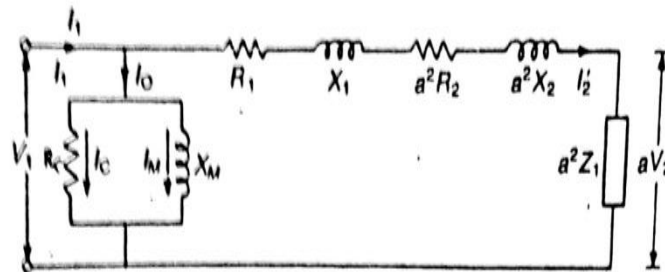


Persamaan terakhir mengandung pengertian bahwa apabila parameter rangkaian sekunder dinyatakan dalam harga rangkaian primer, harganya perlu dikalikan dengan faktor α^2 . Sekarang model rangkaian menjadi sebagai terlihat pada gambar 2.10.



Gambar 2.9 Rangkaian primer dengan parameter rangkaian sekunder

Untuk memudahkan hasil analisis (perhitungan), model rangkaian tersebut dapat diubah menjadi seperti dapat dilihat pada gambar berikut.⁷



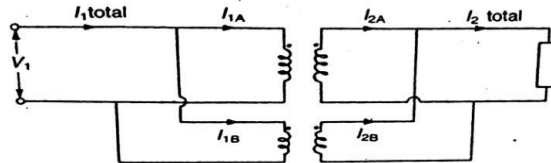
Gambar 2.10. Rangkaian ekivalen trafo

⁷Zuhal, *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*, Jakarta, Gramedia Pustaka Utama, 1988,



2.6. Kerja Paralel Transformator

Tujuan utama kerja parallel ialah agar beban yang dipikul sebanding dengan kemampuan kVA masing - masing transformator, hingga tidak terjadi pembebanan lebih dan pemanasan lebih



Gambar 2.11 Paralel Transformator

Untuk paralel transformator diperlukan beberapa syarat yaitu :

1. Perbandingan tegangan harus sama

Jika perbandingan tegangan tidak sama, maka tegangan induksi pada kumparan sekunder masing – masing transformator tidak sama. Perbedaan ini menyebabkan terjadinya arus pusar pada kumparan sekunder ketika transformator dibebani. Arus ini menimbulkan panas pada kumparan sekunder tersebut.

2. Polaritas transformator harus sama
3. Tegangan impedansi pada keadaan berbeban penuh harus sama

Dari persamaan rangkaian ekivalen yang lalu diketahui :

$$V_1 = I_1 Z_{ek} + V_2' \quad \dots\dots\dots (2.28)$$

Dua transformator yang diparalelkan sebagai berikut :

$$I_1 \text{ total} = I_{1A} + I_{1B} \quad \dots\dots\dots (2.29)$$

Karena

$$V_1 = I_1 Z_{ek} + V_2' \quad \dots\dots\dots (2.30)$$

Maka untuk beban penuh

$$V_1 - V_2' = I_{1A} Z_{1A} = I_{1B} Z_{1B} \quad \dots\dots\dots (2.31)$$



Persamaan diatas mengandung arti , agar kedua transformator membagi beban sesuatu dengan kemampuan kVA nya, sehingga tegangan impedansi pada keadaan beban penuh kedua transformator tersebut harus sama ($I_{1A} \times Z_{1A} = I_{1B} \times Z_{1B}$). Dengan demikian dapat juga dikatakan bahwa kedua transformator tersebut mempunyai impedansi per unit (pu) yang sama.

4. Perbandingan reaktansi terhadap tahanan sebaiknya sama

Apabila perbandingan R/X sama, maka kedua transformator tersebut akan bekerja pada faktor kerja yang sama⁷

Memparalel trafo yang salah satu parameter diatas tidak terpenuhi dapat menimbulkan arus sirkulasi antar trafo dan pembagian pembebanan trafo tidak sesuai dengan yang diinginkan. Sehingga situasi tersebut akan menyebabkan turunnya efisiensi trafo serta menurunkan kemampuan trafo dalam melayani beban.

Penjelasan terkait tidak dapatnya diparalel transformator yang salah satu parameternya tidak sama, adalah sbb :

1. Pembagian arus untuk masing - masing transformator, dengan total beban yang sama dengan total kapasitas seluruh trafo yang diparalel, maka salah satu trafo akan mengalami kelebihan beban (overload)
2. Arus sirkulasi antar trafo akan naik 10% dari arus pada saat kapasitas penuh.
3. Gabungan antara arus sirkulasi masing-masing trafo serta arus pada saat beban penuh akan melebihi kapasitas arus pada saat beban penuh pada setiap trafo tersebut².

⁷Zuhal,*Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*, Jakarta, Gramedia Pustaka Utama, 1988, Hal 47 – 49

²<https://direktorilistrik.blogspot.co.id/2012/10/syarat-memparalel-transformator-trafo.html>(diakses pada hari minggu , tanggal 21 mei 2017. Pukul 23.25 WIB)



2.7. Menentukan Parameter Transformator

Rumus-Rumus Dasar Elektrikal (Daya)

Daya Listrik dapat dibagi menjadi 3 macam yaitu sebagai berikut :

1. Daya Nyata (P)
2. Daya Semu (S)
3. Daya Reaktif (Q)

Berikut penjelasan singkat dan rumus-rumus daya listrik :

2.7.1. Daya Nyata (P)

Daya nyata merupakan daya listrik yang diserap oleh resistansi beban dan ini diukur dalam bentuk satuan watt.

$$P_1 = P_2 = V_P \cdot I_P = V_S \cdot I_S \dots\dots\dots(2.32)$$

$$\text{Line to netral / 1 fasa } P\phi = V \times I \times \cos \phi \dots\dots\dots (2.33)$$

$$\text{Line to line/ 3 fasa } P3\phi = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \phi \dots\dots\dots(2.34)$$

Ket :

P = Daya Nyata (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus yang mengalir pada penghantar (Amper)

COS ϕ = Faktor Daya

2.7.2. Daya Semu (S)

Besaran yang dilambangkan dengan huruf S yang mengukur dalam satuan volt – ampere disebut sebagai daya semu, karena ini adalah jumlah yang akan menghitung dengan mengukur tegangan rms beban dan arus tanpa sudut fase dari beban.

$$\text{Line to netral/ 1 fasa } S\phi = V \times I \dots\dots\dots (2.35)$$

$$\text{Line to line/ 3 fasa } S3\phi = \sqrt{3} \times V \times I \dots\dots\dots (2.36)$$



Ket :

S = Daya semu (VA)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus yang mengalir pada penghantar (Ampere)

2.7.3. Daya Reaktif (Q)

Q adalah lambang dari daya reaktif, karena hal ini terkait dengan beban reaktansi yang satuannya yaitu volt – ampere reaktif atau VAR. catatan, Daya reaktif merupakan pertukaran antara sumber dan bagian reaktif dari muatan; Dengan demikian tidak ada daya bersih yang diperoleh atau hilang dalam prosesnya, karena daya reaktif rata-rata adalah nol.

Line to netral/ 1 fasa

$$Q\emptyset = V \times I \times \sin \emptyset \dots\dots\dots (2.37)$$

Line to line/ 3 fasa

$$Q3\emptyset = \sqrt{3} \times V \times I \times \sin \emptyset \dots\dots\dots (2.38)$$

Ket :

Q = Daya reaktif (VAR)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

$\sin \emptyset$ = Faktor Daya⁶

Parameter transformator yang terdapat pada model rangkaian (rangkaian ekuivalen) R_c , X_m , R_{ek} , dan X_{ek} , dapat ditentukan besarnya dengan dua macam pengukuran (test) yaitu pengukuran beban nol dan pengukuran hubungan singkat.

⁶Rizzoni, Giorgio, *Principle and Applications of Electrical Engineering* (Revised 4th ed), ISBN 0-07-288771-0, 2004, Hal 337



2.7.4. Pengukuran Beban Nol

Dalam keadaan tanpa beban bila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan V_1 , seperti telah diterangkan terdahulu maka hanya I_0 yang mengalir.

Dari pengukuran daya yang masuk (P_1), arus I_0 dan tegangan V_1 akan diperoleh harga $R_c = V_1^2 / P_1$

$$Z_0 = V_1 / I_0 = jX_m R_c / R_c + j X_m \dots\dots\dots (2.40)$$

Dengan demikian, dari pengukuran beban nol dapat diketahui harga R_c , dan X_m

2.7.5. Pengukuran Hubungan Singkat

Hubungan singkat berarti impedansi beban Z_L diperkecil menjadi nol, sehingga hanya impedansi $Z_{ek} = R_{ek} + jX_{ek}$ yang membatasi arus. Karena harga R_{ek} dan X_{ek} ini relatif kecil, harus dijaga agar tegangan yang masuk (V_{hs}) cukup kecil sehingga arus yang dihasilkan tidak melebihi arus nominal, sehingga pada pengukuran ini dapat diabaikan.

Dengan mengukur tegangan V_{hs} , arus I_{hs} , dan daya P_{hs} akan dapat dihitung parameter :

$$R_{ek} = \frac{P_{hs}}{(I_{hs})^2} \dots\dots\dots (2.41)$$

$$Z_{ek} = \frac{V_{hs}}{(I_{hs})^2} = R_{ek} + jX_{ek} \dots\dots\dots (2.42)$$

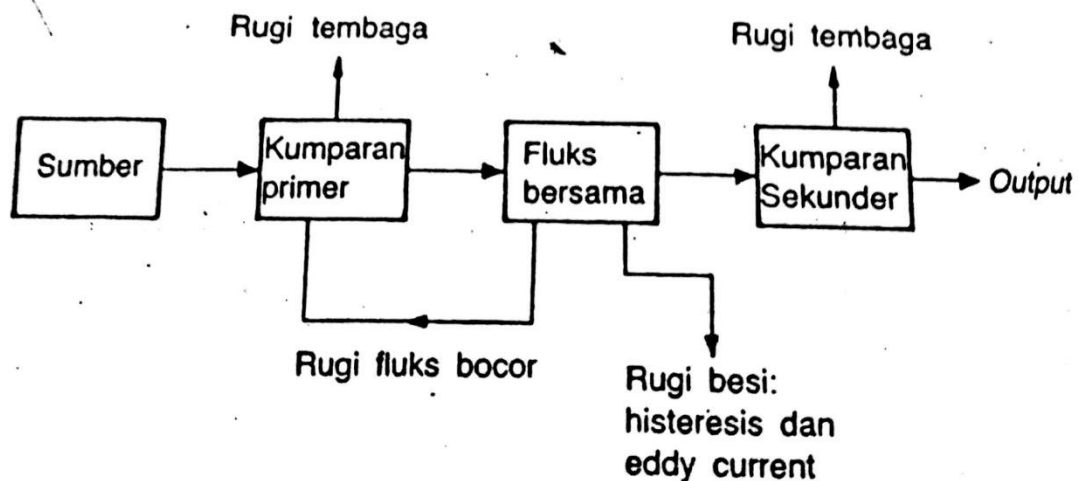
$$(X_{ek})^2 = (Z_{ek})^2 - (R_{ek})^2 \dots\dots\dots (2.43)^3$$

³<http://rezaandroid.blogspot.co.id/2013/11/pengukuran-hubung-singkat-trafo.html> (diakses pada hari minggu, tanggal 21 mei 2017. Pukul 23.40 WIB)



2.8. Rugi-Rugi dan Efisiensi pada Transformator

Rugi – rugi daya transformator berupa rugi inti atau rugi besi dan rugi tembaga yang terdapat pada kumparan primer maupun kumparan sekunder. Untuk mengurangi rugi besi haruslah diambil inti besi yang penampangnya cukup besar agar fluks magnet mudah mengalir di dalamnya. Untuk memperkecil rugi tembaga, haruslah diambil kawat tembaga yang penampangnya cukup besar untuk mengalirkan arus listrik yang diperlukan. Rugi inti terdiri dari rugi arus eddy dan rugi histerisis. Rugi arus eddy timbul karena adanya arus pusar pada inti yang dapat menghasilkan panas. Adapun arus pusar inti ditentukan oleh tegangan induksi pada inti yang menghasilkan perubahan – perubahan fluks magnet.⁵



Gambar 2.12 Blok Diagram Rugi – Rugi Pada Transformator

⁵RIJONO, Yon, *Dasar Teknik Tenaga Listrik* (Edisi Revisi), Yogyakarta, Andi, 2002 Hal 48.



2.8.1. Rugi Tembaga (P_{cu})

Rugi yang disebabkan arus mengalir pada kawat tembaga yang terjadi pada kumparan sekunder dapat ditulis sebagai berikut :

$$P_{cu} = I^2 R \text{ (Watt) } \dots\dots\dots (2.44)$$

Formula ini merupakan perhitungan untuk pendekatan. Karena arus beban berubah-ubah, rugi tembaga juga tidak konstan bergantung pada beban. Dan perlu diperhatikan pula resistansi disini merupakan resistansi AC.

2.8.2 Rugi Besi (P_i)

Rugi besi terdiri atas :

- a. Rugi histerisis (P_h), yaitu rugi yang disebabkan fluks bolak – balik pada inti besi yang dinyatakan sebagai :

$$P_h = K_h f B_{max} \text{ (watt) } \dots\dots\dots (2.45)$$

K_h = konstanta

B_{max} = Fluks maksimum (weber)

- b. Rugi arus eddy (P_e) , yaitu rugi yang disebabkan arus pusar pada inti besi. Dirumuskan sebagai :

$$P_e = K_e f^2 B_{max}^2 \text{ (Watt) } \dots\dots\dots (2.46)$$

K_e = konstanta

B_{max} = Fluks maksimum (weber) Jadi, rugi besi (rugi inti) adalah :

$$P_i = P_h + P_e \text{ (Watt) } \dots\dots\dots (2.47)^4$$

⁴<http://riza-electrical.blogspot.co.id/2011/12/tentang-saya.html> (diakses pada hari minggu, tanggal 25 mei 2017. Pukul 21.42 WIB)



2.8.3. Efisiensi (η)

Efisiensi trafo adalah perbandingan antar daya output dengan daya input yang dinyatakan sebagai :

$$\eta = \frac{\text{Daya keluar}}{\text{Daya masuk}} \times 100 \% \dots\dots\dots (2.48)$$

$$\eta = \frac{\text{Daya keluar}}{\text{Daya masuk}} = \frac{\text{Daya keluar}}{\text{Daya masuk} + \sum \text{rugi}} = 1 - \frac{\sum \text{rugi}}{\text{Daya masuk}} \dots\dots\dots (2.49)$$

$$\text{dimana } \sum \text{rugi} = P_{cu} + P_i \dots\dots\dots (2.50)$$

1. Perubahan Efisiensi terhadap Beban

Perubahan efisiensi terhadap beban dinyatakan sebagai :

$$\eta = \frac{V_2 \cos \phi}{(V_2 \cos \phi + I_2 R_{2ek} + (P_i/I_2))} \dots\dots\dots (2.51)$$

Agar η maksimum , maka :

$$\frac{d}{dI_2} \left(I_2 R_{2ek} + \frac{P_i}{I_2} \right) = 0 \dots\dots\dots (2.52)$$

Jadi ,

$$R_{2ek} = \frac{P_i}{I_2^2} \dots\dots\dots (2.53)$$

$$P_i = I_2^2 R_{2ek} = P_{cu} \dots\dots\dots (2.54)$$

Artinya : Untuk beban tertentu, efisiensi maksimum terjadi ketika rugi tembaga = rugi inti.



2. Perubahan efisiensi terhadap Faktor Kerja (Cos Ø) Beban

Perubahan efisiensi terhadap factor kerja (Cos Ø) beban dapat dinyatakan sebagai:

$$\eta = 1 - \frac{\sum rugi}{V_2 I_2 \cos \phi + \sum rugi} \dots \dots \dots (2.55)$$

$$\eta = 1 - \frac{\sum rugi / V_2 I_2}{\cos \phi + \sum rugi / V_2 I_2} \dots \dots \dots (2.56)$$

bila $\sum rugi / V_2 I_2 = X = \text{konstan}$, maka

$$\eta = 1 - \frac{X}{\cos \phi + X} \dots \dots \dots (2.57)$$

$$\eta = 1 - \frac{X / \cos \phi}{1 + X / \cos \phi} \dots \dots \dots (2.58)^7$$



Gambar 2.13. Hubungan antara efisiensi dengan beban pada cos Ø berbeda - beda

⁷Zuhal, *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*, Jakarta, Gramedia Pustaka Utama, 1988, Hal 55 – 56